

УДК 621.791

Е. Б. Вотинова, А. С. Табатчиков, Н. С. Роженцов, А. В. Кивилев

Уральский федеральный университет,

г. Екатеринбург

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА ЭЛЕМЕНТОВ В НАПЛАВЛЕННЫЙ МЕТАЛЛ ПРИ СВАРКЕ РУТИЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

В работе приводится методика оценки парциальных коэффициентов перехода при ручной дуговой сварке и результаты расчетов.

Ключевые слова: *ручная дуговая сварка, коэффициент перехода элемента, расчет состава металла шва.*

E. B. Votinova, A. S. Tabatchikov, N. S. Rozhentsov, A. V. Kivilev

RESEARCH PARTIAL ELEMENT TRANSFER COEFFICIENT IN THE WELD METAL OF MMA WELDING BY RUTILE ELECTRODES

In the technique of evaluation of partial coefficients of transition for manual arc welding.

Keywords: *arc welder, coefficient of transition elements, calculation of the weld metal.*

Введение

Состав наплавленного металла может быть определен, если известны общие, усредненные коэффициенты перехода элементов. Последние находят чаще всего экспериментально для конкретных условий сварки, что не позволяет гарантировать точность прогноза при изменившихся условиях. В связи с этим, была разработана методика определения парциальных коэффициентов перехода элементов, т.е. коэффициентов перехода на каждой стадии нагрева и плавления, и их зависимости от параметров режима сварки.

Описание методики

Общий коэффициент перехода элемента показывает, какая доля элемента теряется в процессе сварке [1]. При плавлении электрода протекают следующие

процессы в дуговом промежутке: плавление стержня электрода и формирование капель металла; плавление металлической части покрытия электрода (ферросплавов) и формирование капель металла; плавление неметаллической части покрытия электрода (оксидов, органических соединений) и формирование капель шлака; удаление газообразных компонентов из зоны сварки; восстановление металлических компонентов из оксидов шлака.

В соответствии с выделенными процессами, протекающими при плавлении электрода, введем следующие обозначения:

$K_1^{\Xi_i}$ – доля массы компонента Ξ_i металлической части покрытия электрода, окисляемой газом и шлаком;

$K_2^{\Xi_i}$ – доля массы компонента Ξ_i металла стержня, окисляемой газом и шлаком;

$K_3^{\Xi_i}$ – доля массы оксида компонента Ξ_i неметаллической части шихты (покрытия), переходящей в металл в результате реакций восстановления на стадии капли.

Введем уравнения связывающие величины $K_1^{\Xi_i}$, $K_2^{\Xi_i}$ и $K_3^{\Xi_i}$ с парциальными коэффициентами перехода η_{Ξ_i} :

$$1 - K_1^{\Xi_i} = \eta_{\Xi_i}^{\text{ст}}, \quad (1)$$

$$1 - K_2^{\Xi_i} = \eta_{\Xi_i}^{\Phi}, \quad (2)$$

$$K_3^{\Xi_i} = \eta_{\Xi_i}^{\text{ш}}, \quad (3)$$

где $\eta_{\Xi_i}^{\text{ст}}$, $\eta_{\Xi_i}^{\Phi}$, $\eta_{\Xi_i}^{\text{ш}}$ – парциальные коэффициенты перехода элемента Ξ_i в наплавленный металл из стержня, ферросплавов и шлака, соответственно.

В связи с этим предположили, что усредненный коэффициент перехода имеет следующую взаимосвязь с парциальными коэффициентами:

$$\eta_{\Xi_i} = a \eta_{\Xi_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\Xi_i}^{\Phi} + c \eta_{\Xi_i}^{\text{ш}} = a(1 - K_1^{\Xi_i}) + b(1 - K_2^{\Xi_i}) + c K_3^{\Xi_i}, \quad (4)$$

где a , b , c – доли участия электродного стержня, ферросплавов и

восстановленных из шлака компонентов в наплавленном металле; η_{Ξ_i} – общий, усредненный коэффициент перехода элемента Ξ_i .

Определение парциальных коэффициентов перехода заключается в решении системы уравнений с тремя неизвестными (5).

$$(5) \quad \left\{ \begin{aligned} \eta_{\Xi_i} &= a \eta_{\Xi_i}^{\text{ст}} + b \eta_{\Xi_i}^{\phi} + c \eta_{\Xi_i}^{\text{ш}} = \frac{m_{\Xi_{\text{эл}}} \frac{1-K_{\text{пот}}}{1+K_{\text{мп}}}}{m_{\text{н.м}}} \times \left\{ (1-K_2^{\Xi_i} - K_3^{\Xi_i}) + \frac{K_{\text{мп}}}{1+\frac{\alpha\beta}{100}} (1-K_1^{\Xi_i} - K_3^{\Xi_i}) + K_3^{\Xi_i} \right\}, \\ m_{\Xi_i} &= m_{\Xi_{\text{эл}}} \frac{1-K_{\text{пот}}}{1+K_{\text{мп}}} \times \\ &\times \left\{ \frac{[\Xi_i]_{\text{ст}}}{100} (1-K_2^{\Xi_i}) + \frac{K_{\text{мп}}}{1+\frac{\alpha\beta}{100}} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\Xi_i]_k}{100} (1-K_1^{\Xi_i}) + \sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\Xi_{\text{ин}} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\Xi_{\text{ин}} O_m)_{\text{св}}}{100} \right) \frac{M_{\Xi_i}}{M_{\Xi_{\text{ин}} O_m}} K_3^{\Xi_i} \right\} \\ m_{\Xi_{\text{ин}} O_m} &= \frac{m_{\Xi_{\text{эл}}} K (1-K_{\text{пот}})}{1+K_{\text{мп}}} \times \\ &\times \left\{ \frac{[\Xi_i]_{\text{ст}}}{100} \frac{M_{\Xi_{\text{ин}} O_m}}{M_{\Xi_i}} K_2^{\Xi_i} + \frac{K_{\text{мп}}}{1+\frac{\alpha\beta}{100}} \left(\sum_{k=1}^k \frac{\% \text{фер}_k}{100} \frac{[\Xi_i]_k}{100} \frac{M_{\Xi_{\text{ин}} O_m}}{M_{\Xi_i}} K_1^{\Xi_i} + \left(\sum_{j=1}^j \frac{\% j}{100} \frac{(\Xi_{\text{ин}} O_m)_j}{100} + \frac{\alpha\beta}{100} \frac{(\Xi_{\text{ин}} O_m)_{\text{св}}}{100} \right) (1-K_3^{\Xi_i}) \right) \right\} \end{aligned} \right.$$

где m_{Ξ_i} – масса элемента Ξ_i в данном объеме металла, кг; $m_{\Xi_{\text{эл}}}$ – масса электрода, кг; $K_{\text{пот}}$ – коэффициент потерь, учитывающий испарение компонентов и разбрызгивание металла; $K_{\text{мп}}$ – коэффициента массы покрытия; $[\Xi_i]_{\text{ст}}$ – концентрация компонента Ξ_i в стержне электрода, мас.%; $\% \text{фер}_k$ – концентрация ферросплава k в покрытии электрода, мас.%; $[\Xi_i]_k$ – концентрация компонента Ξ_i в ферросплаве k , мас.%; $\% j$ – концентрация минерала j в покрытии электрода, мас.%; $(\Xi_{\text{ин}} O_m)$ – концентрация оксида $\Xi_{\text{ин}} O_m$ в минерале j , мас.%; $(\Xi_{\text{ин}} O_m)_{\text{св}}$ – концентрация оксида $\Xi_{\text{ин}} O_m$ в жидком стекле, мас.%; M_{Ξ_i} – атомная масса элемента Ξ_i , кг/моль; $M_{\Xi_{\text{ин}} O_m}$ – молекулярная масса оксида $\Xi_{\text{ин}} O_m$, кг/моль; $m_{\Xi_{\text{ин}} O_m}$ – масса оксида $\Xi_{\text{ин}} O_m$ в шлаке, кг; α – содержание связующего (жидкого стекла) в покрытии электрода, мас.%; β – массовая доля сухого остатка связующего.

Массу компонента в металлической или шлаковой ванне определяем следующим образом.

$$m_{\mathcal{E}_i} = \frac{m_{\text{св.ванны}} \cdot [\mathcal{E}_i]_{\text{распл}}}{100} \quad (6)$$

$$m_{\mathcal{E}_{in}O_m} = \frac{m_{\text{шлак.ванны}} \cdot (\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{распл}}}{100}, \quad (7)$$

где $m_{\text{св.ванны}}$ – масса сварочной ванны, кг; $[\mathcal{E}_i]_{\text{распл}}$ – концентрация компонента \mathcal{E}_i в расплаве (сварочной ванне), мас.%; $m_{\text{шлак.ванны}}$ – масса шлаковой ванны, кг; $(\mathcal{E}_{in}O_m)_{\text{распл}}$ – концентрация оксида $\mathcal{E}_{in}O_m$ в шлаке (шлаковой ванне), мас. %.

Для решения системы уравнений (5) необходимы следующие справочные и экспериментальные данные [1].

Проведение эксперимента

Наплавка осуществлялась на сварочном посту, оборудованном источником питания Шторм *Lorch X350*, измерительным блоком БИ-01 (*Selma*) и механизмом перемещения *Noboruder NB-2SV*. Установка обеспечивала: постоянный ток, варьирование, установление и поддержание параметров режима на заданном уровне, измерение сварочного тока и напряжения, равномерную подачу электрода в зону сварки (наплавки).

Образец представлял собой пластину размером 50x200x8 мм из стали Ст3 по ГОСТ 380–94. Образец подвергался зачистке от окалины и прочих загрязнений до металлического блеска. Затем осуществлялась наплавка ниточного валика на проход на заданном режиме с целью определения массы израсходованного электрода и массы наплавленного металла и шлака. Во время наплавки проводились измерения мгновенных значений тока и напряжения. После взвешивания на эту же пластину наплавлялся валик в 5 слоев для получения в верхнем слое чистого наплавленного металла, т. е. без влияния основного металла.

Наплавка производилась в нижнем положении на рекомендованных в ТУ режимах. На каждый диаметр электрода режим настраивался трижды: минимальное, среднее и максимальное значение в рекомендованном диапазоне. Режимы наплавки ниточного и многослойного валиков на одной пластине совпадали.

Эксперимент позволил найти значения масс сварочной и шлаковой ванн при заданных параметрах режима, а также установить зависимость между массами сварочной и шлаковой ванн, коэффициентом массы покрытия и мощностью дуги.

$$m_{\text{св.ванны}} \cdot K_{\text{МП}} = 34,28 - 1,59 \cdot P \quad (8)$$

С применением методов дисперсионного и регрессионного анализов результатов измерений получили следующие метрологические характеристики: среднее квадратичное отклонение $S_{\bar{x}} = 0,16$ г; коэффициент детерминации $R^2 = 0,97$; $F_{\text{рас.}} > F_{\text{таб.}}$. Здесь $F_{\text{рас.}}$ – коэффициент Фишера, рассчитанный по экспериментальным данным; $F_{\text{таб.}}$ – табличное значение критерия Фишера; $X = m_{\text{св.ванны}} \cdot K_{\text{МП}}$.

Аналогично были обработаны результаты по зависимости массы шлаковой ванны от параметров режима и характеристик электродов (3.3):

$$m_{\text{шл.ванны}} = (59,19 - 5,35 \cdot P) \cdot K_{\text{МП}} \quad (S = 0,90; R^2 = 0,79; F_{\text{рас.}} > F_{\text{таб.}}) \quad (9)$$

Также были рассчитаны парциальные и усредненные коэффициенты перехода углерода, марганца, кремния и титана в наплавленный металл при ручной дуговой сварке электродами МР 3 диаметром 4 мм (табл. 1).

Таблица 1

Парциальные коэффициенты перехода для электродов МР-3, диаметр 4 мм

| Парциальный коэффициент перехода элементов | Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона | Элемент | | | |
|--|--|----------|-----------|-----------|----------------------|
| | | <i>C</i> | <i>Mn</i> | <i>Si</i> | <i>Ti</i> |
| <i>I</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> |
| $\eta_{\text{Э}_i}^{\Phi}$ | Минимальный ток | 1,0 | 0,863 | 0,400 | - |
| | Средний ток | 1,0 | 0,746 | 0,324 | - |
| | Максимальный ток | 1,0 | 0,610 | 0,221 | - |
| $\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}}$ | Минимальный ток | 0,780 | 0,963 | 0,463 | - |
| | Средний ток | 0,503 | 0,738 | 0,340 | - |
| | Максимальный ток | 0,717 | 0,450 | 0,183 | - |
| $\bar{\eta}_{\text{Э}_i}$ | Минимальный ток | 0,796 | 0,890 | 0,440 | $2,71 \cdot 10^{-4}$ |
| | Средний ток | 0,531 | 0,725 | 0,332 | $4,53 \cdot 10^{-4}$ |
| | Максимальный ток | 0,733 | 0,490 | 0,154 | $6,17 \cdot 10^{-4}$ |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---------------------------------|------------------|---|---|---|----------------------|
| $\eta_{\text{Э}_i}^{\text{шл}}$ | Минимальный ток | - | - | - | $2,71 \cdot 10^{-4}$ |
| | Средний ток | - | - | - | $4,53 \cdot 10^{-4}$ |
| | Максимальный ток | - | - | - | $6,17 \cdot 10^{-4}$ |

В результате обработки экспериментальных и расчетных данных получены регрессионные уравнения (табл. 2).

Таблица 2

Уравнения для расчета усредненных и парциальных коэффициентов перехода элементов

| Элемент | $\eta_{\text{Э}_i}^{\Phi}$ | $\eta_{\text{Э}_i}^{\text{ст}}$ | $\bar{\eta}_{\text{Э}_i}$ |
|-----------|---|---------------------------------|---------------------------|
| <i>Mn</i> | $1,30 - 2,15 \cdot P/S$ | $1,83 - 4,32 \cdot P/S$ | $1,41 - 2,65 \cdot P/S$ |
| <i>Si</i> | $0,67 - 1,40 \cdot P/S$ | $0,85 - 2,0 \cdot P/S$ | $0,85 - 2,0 \cdot P/S$ |
| <i>C</i> | $2,81 - 6,86 \cdot P/S$ | $1,24 - 1,53 \cdot P/S$ | $1,20 - 1,59 \cdot P/S$ |
| <i>Ti</i> | $\bar{\eta}_{\text{Э}_i} = \eta_{\text{Э}_i}^{\text{шл}} = (25,9 \cdot P/S - 2,47) \cdot 10^{-4}$ | | |

Результаты экспериментов по однослойной наплавке позволили получить данные для перехода элементов в металл сварного шва (табл. 3).

$$\gamma_{\text{ОМ}} = 0,24 + 0,75 \cdot P/S \quad (S=0,021; R^2 = 0,52; F_{\text{рас.}} > F_{\text{таб.}}) \quad (10)$$

Таблица 3

Коэффициенты перехода элементов в металл шва для электродов МР-3

| Парциальный коэффициент перехода элементов | Значения тока из рекомендованного в ТУ диапазона | Элемент | | | |
|--|--|----------|-----------|-----------|-----------|
| | | <i>C</i> | <i>Mn</i> | <i>Si</i> | <i>Ti</i> |
| $\eta_{\text{Э}_i}^{\text{О.М.}}$ | Минимальный ток | 0,848 | 0,951 | 0,860 | 0,723 |
| | Средний ток | - | - | - | 0,858 |
| | Максимальный ток | 0,798 | - | 0,984 | 0,923 |
| $\bar{\eta}_{\text{Э}_i}^{\text{шов}}$ | Минимальный ток | 0,897 | 0,984 | 0,946 | 0,59 |
| | Средний ток | - | - | - | 0,930 |
| | Максимальный ток | 0,845 | - | 0,993 | 0,961 |
| $\gamma_{\text{О.М.}}$ | Минимальный ток | 0,30 | | | |
| | Средний ток | 0,41 | | | |
| | Максимальный ток | 0,50 | | | |

Заключение. Применена разработанная методика для оценки парциальные, усредненные коэффициенты перехода элементов и доли участия основного металла в формировании сварного шва в зависимости от параметров режима при сварке электродами МР-3.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, контракт № Н979.42Б.002/14 «Исследование физических и химических процессов в зоне сварки для создания научных основ оптимизации технологий и разработки материалов».

Список литературы

1. Вотинова Е. Б., Шалимов М. П. Разработка методики расчета состава металла шва при сварке покрытыми электродами или порошковой проволокой // Сварка и диагностика. – № 5. – 2011. – С. 31–35.